

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 196 41 843 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁶:
F 23 R 3/28

②1 Aktenzeichen: 196 41 843.7
②2 Anmeldetag: 10. 10. 96
④3 Offenlegungstag: 17. 4. 97

DE 196 41 843 A 1

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1
13.10.95 US 005459 26.04.96 US 644609
⑦1 Anmelder:
U.S. Department of Energy, Washington, D.C., US
⑦4 Vertreter:
Wagner, K., Dipl.-Ing.; Geyer, U., Dipl.-Phys.
Dr.rer.nat., Pat.-Anwälte, 80538 München

⑦2 Erfinder:
Gemmen, Randall S., Morgantown, W.Va., US;
Richards, George A., Morgantown, W.Va., US; Yip,
Mui-Tong Joseph, Morgantown, W.Va., US; Robey,
Edward H., Westover, W.Va., US; Cully, Scott R.,
Morgantown, W.Va., US; Addis, Richard E.,
Smithfield, Pa., US

⑤4 Stabilisierung von Druckschwingen in Verbrennungsvorrichtungen sowie Verfahren hierfür

⑤7 In mit Kohlenwasserstoff-Brennstoffen betriebenen Verbrennungsvorrichtungen treten typischerweise hohe dynamische Druckschwingungen auf, sobald die Transport- bzw. Überführungszeit des Brennstoffs zur Flammenfront einen Wert entsprechend einem bestimmten Bruchteil der akustischen Periode besitzt. Diese Schwingungen werden durch eine Umstrukturierung oder Repositionierung (Verlagerung) der Flammenfront in der Verbrennungsvorrichtung zur Vergrößerung der Transport- bzw. Überführungszeit, auf annehmbar niedrigere Pegel verringert. Eine stromaufwärts der oszillierenden Flamme gelegene und mit einer ausgewählten Frequenz und Periodendauer gepulste Pilotflammenfront bewirkt eine wirksame Umstrukturierung und Verlagerung der oszillierenden Flamme in der Verbrennungsvorrichtung, zur Veränderung der die Schwingungen verursachenden Transport- bzw. Überführungszeit.

DE 196 41 843 A 1

Beschreibung

Hintergrund der Erfindung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf die Beherrschung und Kontrolle von Verbrennungsschwingungen in Verbrennungssystemen, und näherhin auf eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Verringerung unerwünscht hoher dynamischer Druckoszillationen in einer Verbrennungskammer auf annähernd niedrigeren Pegel, durch Anwendung einer pulsierenden Pilotflamme zur selektiven Positionierung oder Umstrukturierung der oszillierenden Flammenfront in der Verbrennungskammer. Die US-Regierung ist aufgrund von Anstellungsverträgen zwischen dem US Department of Energy und den Erfindern an der vorliegenden Erfindung berechtigt.

Bei Verbrennungssystemen, wie sie beispielsweise in Verbindung mit Gasturbinen und Dampfgeneratoren verwendet werden, dient üblicherweise ein Kohlenwasserstoff-Brennstoff mit Luft in im wesentlichen stöchiometrischen Verhältnissen in einer zugeordneten Verbrennungskammer (Brennkammer) zur Erzeugung von ausreichender Wärmeenergie für den Antrieb der Turbine oder für die Dampferzeugung. Die aus der Verbrennung von Kohlenwasserstoff-Brennstoffen in derartigen Anwendungen resultierenden Abgasemissionen haben eine gewisse Umweltverunreinigung verursacht. Zu den Bestrebungen, diese die Umwelt verunreinigenden Emissionen zu verringern, gehört das Vormischen von Brennstoff und Luft vor der Einleitung des Gemischs in die Verbrennungskammer. Auch die Anwendung derartiger Vorgemische in Form eines sogenannten mageren Vorgemischs, d. h. eines Gemischs, bei welchem das Brennstoffvolumen in einem geringeren Anteil als dem stöchiometrischen Verhältnis mit der Luft vorliegt, ergibt eine Verringerung an Stickstoffoxidemissionen.

Ein typisches Verbrennungssystem unter Verwendung eines mageren Vorgemischs ist in der US-Patentschrift 5 372 008 vom 13. Dezember 1994 beschrieben, die im Wege der Bezugnahme zum Bestandteil der vorliegenden Offenbarung gemacht wird.

Zwar haben sich durch Anwendung von Vorgemischen (und zwar mageren sowie nahezu oder im wesentlichen stöchiometrischen Vorgemischen) aus einem Kohlenwasserstoff-Brennstoff und Luft die Emissionen von Umweltschadstoffen erfolgreich verringern und so die Auswirkung dieser Emissionen auf die Umwelt entschärfen lassen; jedoch wurde gefunden, daß in mit derartigen Vorgemischen, insbesondere mageren Vorgemischen arbeitenden Verbrennungssystemen eine Verbrennungsinstabilität in Form von dynamischen Druckoszillationen auftritt. Wie durch das Rayleigh-Kriterium, vgl. "Theory of Sound", Volume II, Nr. 8, Dover, New York 1995, bezeichnet, ist die Amplitude der Schwingungen bzw. Oszillationen in der Verbrennungskammer am größten, wenn die Druckwelle in Phasenübereinstimmung mit der durch die Verbrennung des Brennstoff-/Luft-Gemischs erzeugten periodischen Wärmeabgabe steht. Diese dynamischen Druckschwingungen besitzen häufig einen ausreichend hohen Betrag, um unerwünschte Betriebsbedingungen hervorzurufen, einschließlich der Verringerung der Nutzlebensdauer von Komponenten des Verbrennungssystems infolge Materialermüdung, Vibrationen sowie zyklischer Ermüdung.

Bemühungen zur Beseitigung oder Verringerung unannehmbar hoher dynamischer Druckschwingungen in mit Kohlenwasserstoff-Brennstoffen betriebenen Verbrennungssystemen haben einigen Erfolg gezeitigt. Beispielsweise ist in der Veröffentlichung "Practical Active Control System for Combustion Oscillations", P. J. Langhorne, J. Propulsion, Volume 6 Nr. 3, S. 324–333, Mai-Juni 1990, beschrieben, daß die niederfrequente Verbrennungsinstabilität in einer Flamme in einer Brennkammer bildenden Kanal mit Erfolg durch die un stetige, veränderliche Zugabe von Extrabrennstoff beherrscht werden kann. Wie in der genannten Veröffentlichung berichtet, wurde in einer Anwendung, bei welcher der Hauptbrennstoff als ein mageres Vorgemisch mit einem stöchiometrischen Verhältniswert von Brennstoff zu Luft im Bereich von etwa 0,63 bis 0,70 in den Kanal eingeleitet wurde, durch die Zugabe von nur 3% mehr Brennstoff der auf die Verbrennungsinstabilität zurückgehende 164-dB-Peak in dem Druckspektrum in dem Kanal um 12 Decibel (dB) reduziert. Wie weiter in dieser Veröffentlichung berichtet, war der un stetig oder phasengesteuert in den Kanal eingebrachte Überschußbrennstoff ein Vorgemisch mit Luft und wurde genügend nahe der Hauptflamme eingespritzt, um örtlich brennstoffreiche Stellen zu schaffen, welche die Flamme destabilisieren und so die Oszillationen verringern. Zur Steuerung der Einleitung des Sekundärbrennstoffs diente eine Rückkopplungsregelschleife unter Verwendung un stetiger Signale aus der Verbrennungskammer, beispielsweise von Lichtemissionen, die von durch die Verbrennung erzeugten Radikalen nahe dem Verbrennungsbereich hervorgerufen wurden.

Ein anderes bekanntes Verfahren zur Verringerung von Druckschwingungen in mit mageren Vorgemischen von Brennstoff und Luft betriebenen Brennkammern ist in dem Referat mit dem Titel "Combustion Oscillation Control by Cyclic Fuel Injection", G. A. Richards, M. J. Yip, E. Robey, L. Caldwell und D. Rolands, beschrieben, das auf dem 1995 ASME Turbo Expo Meeting, Houston, Texas, am 6. Juni 1995 gehalten wurde. In dieser Veröffentlichung wurde die Beherrschung und Kontrolle über Druckschwingungen in der Verbrennungskammer durch zyklische Einspritzung kleiner Mengen von zusätzlichem Brennstoff erreicht, um der mit den hohen Druckschwingungen verbundenen periodischen Wärmefreisetzung entgegenzuwirken. Der zugesetzte Brennstoff erzeugt sekundäre Wärmeenergie, welche die Wechselwirkung zwischen der thermischen und der akustischen Energie entkoppelt, was zu einer Reduktion der dynamischen Druckamplitude führt.

Über ein weiteres bekanntes Verfahren zur Verringerung der Druckschwingungen in mit Kohlenwasserstoff-Brennstoffen betriebenen Verbrennungskammern wird in der Veröffentlichung "Periodic Chemical Energy Release für Active Combustion Control", K. C. Schadow et al., ISABE-International Symposium on Air Breathing Engines, 11, Vol. I, S. 479–485, Tokyo, Japan, September 1993, berichtet. In dieser Veröffentlichung von Schadow et al. erzeugt ein in einem Rohr stromaufwärts einer Verbrennungskammer angeordneter, mittels Funkenzündung gepulster Verbrennungsantrieb periodische Pilotflammenimpulse, welche Druckschwingungen in der Verbrennungskammer unterdrücken. In dem Verbrennungsantrieb wurde ein stöchiometrisches Brennstoff-/Luft-Gemisch mittels Funkenzündung mit einer Frequenz im Bereich von 50 Hz bis über 1 kHz gezündet. Ein in einer offenen oder geschlossenen Rückführungsteuerung angeordneter Frequenzgenerator, der auf

Druckschwankungen aus der Verbrennungskammer anspricht, dient zur Frequenzsteuerung der Funkenzündung.

Zusammenfassung der Erfindung

Die bekannten aktiven Kontroll- bzw. Steuerungsverfahren zur Verringerung oder Unterdrückung unerwünschter Druckschwingungen in mit Kohlenwasserstoff-Brennstoffen betriebenen Verbrennungssystemen, von denen typische Beispiele in den vorstehend erwähnten Artikeln beschrieben sind, haben einen gewissen Erfolg gezeitigt; das hauptsächliche Ziel und der Zweck der vorliegenden Erfindung richten sich jedoch auf eine noch wirksamere aktive Kontroll- bzw. Steuervorrichtung und auf ein Verfahren zur Erzielung einer Kontrolle oder Stabilisierung von durch unstetige Verbrennung verursachten Druckschwingungen in mit Kohlenwasserstoff-Brennstoffen betriebenen Verbrennungsvorrichtungen. Kurz zusammenfassend gesagt: Sobald unstetige Druckschwingungen in einer Brennkammer auftreten, wie sie wie sie beispielsweise dadurch bedingt sind, daß die Transport- bzw. Überführungszeit des Brennstoffs zur Flammenfront einen gewissen Bruchteil der akustischen Periode ausmacht, wird die Amplitude der Schwingungen in der Verbrennungskammer am größten, sobald die Druckwelle in Phasenübereinstimmung mit der durch die Verbrennung des Brennstoff-/Luft-Gemischs erzeugten periodischen Wärmeabfuhr steht. In Übereinstimmung mit der Zielrichtung der vorliegenden Erfindung wird die aktive Kontrolle von durch unstetige Verbrennung hervorgerufenen Oszillationen in einer mit einem geeigneten Brennstoff-/Oxidationsmittel-Gemisch, beispielsweise einem Kohlenwasserstoff-Brennstoff-/Luft-Gemisch, befeuerten Verbrennungskammer durch Umstrukturierung und Lageverschiebung der Hauptflammenfront erreicht, wodurch die Transport- bzw. Überführungszeit erhöht und die Druckwelle weiter aus der Phasenübereinstimmung mit der periodischen Wärmeabfuhr fort verschoben wird. Die Umstrukturierung und Repositionierung der Hauptflamme werden mittels einer Pilotflamme erreicht, die mit einer vorgegebenen Frequenz entsprechend weniger als der halben Frequenz der Verbrennungsozillation gepulst ist, wobei die jeweilige Dauer der einzelnen Impulse zur Erzielung einer angemessenen sekundären Wärmeenergie ausreicht, um die Hauptflamme umzustrukturieren und damit die Wärmeabfuhr von der akustischen Kopplung zu entkoppeln und so zu einer Verringerung der dynamischen Druckamplitude zu führen. Die pulsierende Pilotflamme erzeugt eine verhältnismäßig kleine und nur intermittierend vorhandene Flammenfront in der Verbrennungszone, die von der oszillierenden Hauptflammenfront getrennt ist, jedoch die erforderliche Wärmeenergie liefert, um die Lage der oszillierenden Hauptflammenfront wirksam aus dem Bereich in der Verbrennungszone zu verlagern, wo die akustische Kopplung mit der Hauptflammenfront stattfinden kann, wodurch die die Oszillation verursachende Phasenbeziehung mit der Verbrennungswärme wirksam verändert wird.

Allgemein gesprochen dient die Vorrichtung der vorliegenden Erfindung zur wirksamen aktiven Kontrolle bzw. Beherrschung unstabiler Verbrennung in einem Verbrennungssystem, das in herkömmlicher Weise eine Verbrennungskammer mit einer Verbrennungszone mit gegenüberliegenden Endbereichen sowie Mittel aufweist, um ein Gemisch aus Brennstoff und einem geeig-

neten Oxidationsmittel am einen Endbereich in die Verbrennungszone einzuführen. Instabile Verbrennung dieses Brennstoff-/Oxidationsmittel-Gemischs bildet eine oszillierende Flammenfront innerhalb der Verbrennungszone an einer Stelle zwischen deren Endbereichen, wobei der Druck und die Amplitude der resultierenden dynamischen Druckschwingungen vom Ausmaß der Phasenübereinstimmung der durch die einzelnen Schwingungen erzielten Druckwelle mit der durch die Verbrennung des Brennstoffs in dem Brennstoff-/Oxidationsmittel-Gemisch erzeugten Wärme abhängen. Die Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung ergibt eine wirksame Verringerung des Drucks und der Amplitude dieser Druckschwingungen innerhalb der Verbrennungskammer und weist folgende Teile auf: ein geeignetes Volumen oder eine Kammer zur Mischung von Brennstoff und Oxidationsmittel, wobei dieses Volumen bzw. diese Kammer mit der Brennkammer an deren erwähntem einen Endbereich in Verbindung steht; mit den Kammermitteln verbundene Oxidationsmittel- und Brennstoffzufuhrmittel zur Einbringung wenigstens eines Stroms aus Brennstoff und Oxidationsmittel in die Kammervorrichtung zur Bildung eines brennbaren Gemischs und zur Erzeugung einer Pilotflamme in der Verbrennungszone in oder nahe deren einem Endbereich; sowie Kontroll- bzw. Steuermittel zur intermittierenden Unterbrechung oder Einschaltung des Brennstoffstroms aus der Brennstoffzufuhrvorrichtung und/oder des Oxidationsmittels aus der Oxidationsmittelzufuhrvorrichtung in die Kammervorrichtung, oder des brennbaren Gemischs aus dem Mischvolumen bzw. der Kammervorrichtung in die Brennkammer, mit einer ausgewählten Frequenz und einer ausgewählten Periodendauer für die aufeinanderfolgende Unterbrechung bzw. Einschaltung, d. h. die Bildung der Pilotflamme, und damit einer ausreichenden Impulssteuerung der Pilotflamme in der genannten Verbrennungszone, zur Bildung einer Quelle von sekundärer Wärmeenergie, die mit der oszillierenden Flamme in der Verbrennungszone in Kontakt gebracht werden kann, zur Umstrukturierung der oszillierenden Flamme unter Änderung oder Verschiebung der Phasenbeziehung der Druckwellen mit der Verbrennungswärme aus einem Zustand der Phasenübereinstimmung weg, um so die Amplitude der Druckschwingungen wirksam zu reduzieren. Die ausgewählte Frequenz und Periodendauer der durch die pulsierende Pilotflamme erzeugten Energieimpulse bewirken eine ausreichende Repositionierung der oszillierenden Flammenfront in der Verbrennungszone und dadurch eine Veränderung der Phasenbeziehung der Druckwelle mit der Verbrennungswärme aus einem Zustand der Phasenübereinstimmung weg, zur Reduzierung der Amplitude der Druckschwingungen.

Als allgemeine Regel kann gelten, daß bei Druckschwingungen in der Verbrennungskammer mit einer Frequenz im Bereich von etwa 20 bis 5000 Hz die intermittierende Unterbrechung bzw. Einschaltung der Strömung von wenigstens einer der Komponenten Brennstoff und Oxidationsmittel in die Pilotkammer, oder eines Gemischs aus ihnen in die Pilotkammer oder die Verbrennungskammer (Brennkammer) mit einer Frequenz von weniger als etwa der halben Frequenz der Hauptflammen-Verbrennungsozillationen erfolgt. Des weiteren gilt, daß die Aufrechterhaltung der Strömung des jeweiligen Pilotbrennstoff- und Oxidationsmittelgemischs während einer Zeitdauer im Bereich von etwa 0,1 bis 0,5 der Steuerfrequenzperiode, vorzugsweise etwa 1

bis 20 Millisekunden (ms), zwischen der jedesmaligen Unterbrechung der Strömung die gewünschte Umstrukturierung der oszillierenden Flamme ergibt, wenn das Brennstoff/Oxidationsmittel-Äquivalenzverhältnis im Bereich von etwa 0,5 bis etwa 1,0 liegt, wie weiter unten mit näheren Einzelheiten beschrieben wird.

Das Verfahren der vorliegenden Erfindung zur Erzielung einer Verringerung der Amplitude der Oszillationen innerhalb der Verbrennungskammer umfaßt die Schritte: Bildung eines zweiten Gemischs aus Brennstoff und Oxidationsmittel, Einführung des zweiten Gemischs in die Verbrennungszone an einer Stelle benachbart wenigstens dem einen Endbereich der Zone zur Bildung einer Pilotflamme in der Verbrennungszone an deren erwähntem einen Endbereich; sowie intermittierende Unterbrechung und Einschaltung der Strömung des Brennstoffs und/oder des Oxidationsmittels, die das zweite Gemisch bilden, oder des zweiten Gemischs nach dessen Bildung, zur Erzeugung diskreter Chargen des zweiten Gemischs zur intermittierenden Erzeugung und Unterbrechung der Pilotflamme mit einer geeigneten Frequenz und Periodendauer zur ausreichenden Umstrukturierung und Repositionierung der oszillierenden Flamme in der Verbrennungszone von der ersten Lage in eine zweite Lage zur Änderung der Phasenbeziehung zwischen den Druckwellen und der Verbrennungswärme gegenüber einem Zustand der Phasenübereinstimmung, zum Zweck einer wesentlichen Reduzierung der Amplitude der Druckschwingungen in der Verbrennungskammer. Die Häufigkeit bzw. Frequenz der intermittierenden Unterbrechung oder Einschaltung der Strömung von wenigstens einer der die diskreten Chargen des Pilotflammengemischs bildenden Komponenten Oxidationsmittel und Brennstoff und die jeweilige Dauer jeder einzelnen Strömung entsprechen der oben erwähnten Steuerfrequenz und Periodendauer.

Weitere Vorteile und Ziele der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der folgenden Beschreibung illustrativer Ausführungsbeispiele und Verfahren sowie aus den beigefügten Ansprüchen, wobei weitere hier nicht speziell erwähnte Vorteile sich für den Fachmann bei der praktischen Ausübung der Erfindung ergeben.

Beschreibung der Zeichnungen

Fig. 1 ist eine schematische Darstellung eines Verbrennungssystems zur Veranschaulichung von durch unstetige Verbrennung induzierten Schwingungen der Hauptflammenfront in der Verbrennungskammer, wie durch die Doppelpfeile angedeutet;

Fig. 2 ist eine graphische Darstellung zur Veranschaulichung der dynamischen Druckschwingung, wie sie in einer mit durch unstetige Verbrennung induzierten Schwingungen arbeitenden Verbrennungskammer der in Fig. 1 gezeigten Art auftritt;

Fig. 3 ist eine schematische Darstellung eines Verbrennungssystems ähnlicher Art wie in Fig. 1, das jedoch mit erfindungsgemäßen Mitteln zur intermittierenden pulsformigen Zufuhr von Pilotbrennstoff in die Pilotkammer zur Vermischung mit einer zugeführten Oxidationsmittelströmung unter Erzeugung einer Reihe von diskreten brennbaren Pilotgemischen versehen ist, die bei Einführung in die Verbrennungskammer intermittierend existierende Pilotflammenfronten bilden, welche die Hauptflammenfront umstrukturieren und verlagern und dadurch eine Entkopplung zwischen den Druckschwingungen und der Verbrennungswärme bewirken, zur Verringerung der Amplitude der Druck-

schwingungen;

Fig. 4 ist eine graphische Darstellung zur Veranschaulichung der Verringerung der Druckschwingungen hoher Amplitude in dem Verbrennungssystem nach Fig. 3, bei Ausrüstung mit dem erfindungsgemäßen Mechanismus zur Stabilisierung von Druckschwingungen in der Verbrennungsvorrichtung;

Fig. 5 ist eine detaillierte Ansicht einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, bei welcher eine Verbrennungskammer mit einer Pilotbrennstoff-/Oxidationsmittel-Mischkammer versehen ist, mit einer Steuerung für die Brennstoffzufuhr zu der Pilotkammer, zur wirksamen intermittierenden Einführung des Pilotbrennstoffs in die Pilotkammer zur Erzeugung einer pulsierenden Pilotflamme in der Verbrennungskammer, zum Zweck der Umstrukturierung der oszillierenden Flammenfront innerhalb der Verbrennungskammer und damit zur Reduzierung der Amplitude der Verbrennungsschwingungen;

Fig. 6 ist ein Blockdiagramm eines Verbrennungssystems, das mit einer offenen Steuer- bzw. Regelschleife zur pulsierenden Brennstoffzufuhr in die Pilotkammer während ausgewählter Zeitdauern versehen ist, zum Zweck der erfindungsgemäßen Verringerung der Amplitude der Druckschwingungen;

Fig. 7 ist eine schematische Ansicht einer weiteren Ausführungsform der Erfindung, bei welcher das Oxidationsmittel, statt wie bei der Ausführungsform nach Fig. 5 der der Pilotkammer zugeführte Brennstoff, intermittierend unterbrochen und eingeschaltet wird, zur pulsierenden Steuerung der Pilotflamme zum Zweck einer Verlagerung der oszillierenden Flammenfront zur Erzielung der Verringerung der Amplitude der Druckschwingungen.

Zum Zweck der Veranschaulichung und Beschreibung wurden bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung gewählt. Die dargestellten bevorzugten Ausführungsformen sollen jedoch weder erschöpfend sein, noch die Erfindung auf die gezeigten spezifischen Ausführungsformen beschränken. Die bevorzugten Ausführungsformen wurden gewählt und beschrieben zur bestmöglichen Erläuterung der Prinzipien der Erfindung und ihrer Anwendung und praktischen Verwendung, um so anderen Fachleuten die bestmögliche Anwendung der Erfindung in verschiedenartigen Ausführungsformen und Modifizierungen zu ermöglichen, die der jeweiligen speziellen Anwendung am besten angepaßt sind. Des weiteren sind zwar die in den Zeichnungen veranschaulichten Brennkammern hinsichtlich Einzelheiten etwas eingeschränkt, jedoch ist klar, daß die jeweilige spezifische Konstruktion und Einzelheiten der Betriebsweise der Verbrennungskammer nicht kritisch sind, da die vorliegende Erfindung in beliebigen Brennkammern von praktisch jeder beliebigen Konfiguration angewandt werden kann, in welchen die hohen Druckschwankungen während des Verbrennungsprozesses auftreten und wo eine gemäß der Erfindung vorgesehene pulsierende Pilotflamme zur Restrukturierung der Lage der Hauptflammenfront dienen kann. Des weiteren sind zwar die Verbrennungskammern in der Zeichnung jeweils mit einer Pilotkammer versehen dargestellt, die koaxial bezüglich der Hauptachse der Brennkammer angeordnet ist, jedoch ist klar, daß die Pilotkammer an anderen Stellen an der Verbrennungskammer angeordnet sein kann, um eine pulsierende Pilotflamme an einer von der oszillierenden Flammenfront verschiedenen Stelle einzuführen und so die primäre oder oszillierende Flammenfront wirksam umzustrukturieren.

rieren und hierdurch die Amplitude der Schwingungen nach Maßgabe der vorliegenden Erfindung zu verringern.

Die Ausdrücke "Pilotkammer" und "Kammermittel" im hier verwendeten Sinn sollen ein beliebiges von Wandungen begrenztes Gebilde bezeichnen, das einen Hohlraum oder ein Volumen bildet, welches mit den Brennstoff- und Oxidationsmittelzuleitungen und mit dem Inneren der Verbrennungskammer in Verbindung steht und ein ausreichendes Vermögen zur wirksamen Mischung der diskreten Chargen von Pilotbrennstoff und Oxidationsmittel besitzt. Die spezielle Form und/oder Lage der Pilotkammer oder der Kammermittel ist für die Wirkungsweise der vorliegenden Erfindung nicht kritisch, solange sie die Vermischung der Pilotbrennstoff-/Oxidationsmittel-Chargen und die Einführung dieser Chargen in die Verbrennungskammer an der geeigneten Stelle gewährleistet, um in dieser die pulsierende Pilotflamme für die Umstrukturierung der Hauptflamme zu erzeugen. Des weiteren bezeichnet der Ausdruck "Pilot" im hier verwendeten Sinn eine Zufuhrate von Brennstoff- und Oxidationsmittelgemisch, die etwa 2 bis etwa 20% der Zufuhrate des für die Hauptflamme verwendeten Brennstoff- und Oxidationsmittelgemischs entspricht. Des weiteren betrifft die nachfolgende Beschreibung zwar in der Hauptsache Ausführungsformen, bei welchen die Brennstoff- oder Oxidationsmittelströmung selektiv zur Erzeugung der gepulsten Pilotflamme in der Verbrennungskammer unterbrochen wird, jedoch ist klar, daß sowohl die Brennstoffströmung als auch die Oxidationsmittelströmung gleichzeitig mit ausgewählten Frequenzen und Zeitdauern zur Erzeugung der diskreten Chargen des Pilotflammerge mischs gesteuert werden können, oder daß die Gemische von Pilotbrennstoff und Oxidationsmittel in die Verbrennungskammer selektiv unterbrochen werden können, um die gepulste Pilotflamme zu erzeugen.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

Wie oben kurz beschrieben, wurde festgestellt, daß die Schwingungen, wie sie häufig in mit flüssigen, gasförmigen und festen Kohlenwasserstoff- oder anderweitigen Brennstoffen in Gegenwart eines geeigneten Oxidationsmittels betriebenen Verbrennungskammern vorliegen, häufig einen so hohen Druck und eine so große Amplitude aufweisen, daß sie den Wirkungsgrad des Verbrennungssystems unzuträglich verringern und gleichzeitig die erwartete Lebensdauer verschiedener der Brennkammer zugeordneter Bauteile infolge von durch die Schwingungen induzierten Vibrationen und zyklischer Ausfälle oder Aussetzer beträchtlich verkürzen. Auch sind, wie oben dargelegt, die Bestrebungen, umweltschädliche Emissionen aus mit Kohlenwasserstoff-Brennstoffen betriebenen Verbrennungskammern durch Verwendung eines stöchiometrisch mageren Vorgemischs zu reduzieren, häufig für die Bildung der unerwünschten, durch unstetige Verbrennung induzierten Oszillationen bzw. Schwingungen verantwortlich. In den Fig. 1 und 2 ist beispielsweise ein herkömmliches Verbrennungssystem 8 veranschaulicht, das eine mit einer Pilotkammer 12 versehene Verbrennungskammer 10 von solcher geeigneten Konfiguration und solchem Typ, wie sie in einer Gasturbine oder in einem Dampferzeugungskessel verwendet wird, aufweist, des weiteren eine Oxidationsmittelzufuhr bei Umgebungsdruck oder bei erhöhten Drucken, wie sie beispielsweise von einem herkömmlichen Kompressor 14 erzeugt werden, sowie

zugeordnete Leitungen 15 zur Zuleitung des Oxidationsmittels von dem Oxidationsmittelvorrat zu der Verbrennungskammer und der Pilotkammer 12 als gesonderte, geeignet bemessene Ströme. Ein Brennstoffzufuhrsystem 16 mit den nötigen Leitungen 17 und 18 ist zur Zufuhr gesonderter Brennstoffströme aus dem Brennstoffvorrat 16 zu der Verbrennungskammer 10 und der Pilotkammer 12 vorgesehen. Bei diesem Brennstoff kann es sich um einen Kohlenwasserstoff-Brennstoff oder einen beliebigen anderweitigen geeigneten Brennstoff in beliebiger, beispielsweise gasförmiger, flüssiger oder fester Form oder einer geeigneten Kombination hiervon handeln. Bei dem Oxidationsmittel kann es sich um jedes beliebige geeignete, die Verbrennung unterhaltende Medium für den verwendeten speziellen Brennstoff handeln. Beispielsweise kann bei einem Kohlenwasserstoff-Brennstoff das Oxidationsmittel durch Luft, Sauerstoff, mit Sauerstoff angereicherte Luft oder anderweitiges sauerstoffhaltiges Gas oder Gase gebildet werden.

Die gesonderten Ströme von Oxidationsmittel aus der Oxidationsmittelzufuhr 14 und von Brennstoff in der Leitung 17 von der Brennstoffzufuhr 16, wie sie zur Erzeugung der allgemein bei 20 angedeuteten Primär- oder Hauptflammenfront in der Verbrennungskammer 10 verwendet werden, werden in einer herkömmlichen Vormischkammer, wie beispielsweise der ringförmigen Kammer 21, die insgesamt in coaxialer Anordnung um die Pilotkammer 12 herum veranschaulicht ist, vorgemischt. Dieses Vorgemisch aus Brennstoff und Oxidationsmittel wird in der dargestellten Weise in die Verbrennungszone 22 im stromaufwärtigen Endbereich der Verbrennungskammer 10 zugeführt, wo das Brennstoff-/Oxidationsmittel-Gemisch unter Bildung der Hauptflammenfront 20 verbrannt wird zur Erzeugung der für die jeweilige gewünschte Nutzanwendung verwendeten Wärmeenergie. Die heißen Verbrennungsprodukte werden aus der Verbrennungskammer (Brennkammer) 10 durch geeignete (nicht dargestellte) Austrittsmittel abgeführt, die im stromabwärtigen Bereich der Verbrennungskammer 10 angeordnet sind.

Die Arbeitsweise eines mit einer Pilotkammer 12 versehenen Verbrennungssystems nach Art von Fig. 1 verläuft wie folgt: Die aufeinander abgestimmten Mengen an Oxidationsmittel und Brennstoff aus der Oxidationsmittelzufuhr 14 und in der Leitung 18 von der Brennstoffzufuhr 16 werden in der Pilotkammer 12 gemischt, aus dieser kontinuierlich in die Verbrennungskammer 10 abgegeben und anfänglich durch geeignete Mittel, wie beispielsweise eine (nicht dargestellte) Glühkerze oder eine Funkenzündvorrichtung zur Erzeugung einer stationären Pilotflamme 23 gezündet, welche sich stromabwärts in die Verbrennungszone 22 hinein erstreckt und die Hauptflammenfront 20 hervorbringt und aufrechterhält. Normalerweise, und insbesondere mit mageren Vorgemischen, ergibt die Verbrennung des vorgemischten Hauptbrennstoff-/Oxidationsmittel-Gemischs keinen stetigstationären Verbrennungszustand bzw. Abbrand, sondern ergibt vielmehr eine unstetige Verbrennung, welche intermittierende Druckwellen und periodische Wärmefreisetzungen bildet, die bewirken, daß die Flammenfront 20 in der Verbrennungszone 22 rückwärts und vorwärts oszilliert, wie durch die Doppelpfeile in der Verbrennungszone 22 allgemein angedeutet. Wie oben erläutert, wurde festgestellt, daß die Oszillationsdruckwelle am stärksten ist, wenn eine Druckwelle sich in Phasenübereinstimmung, oder nahezu in Phasenübereinstimmung, mit der durch die Ver-

brennung des Oxidationsmittel-/Brennstoff-Gemischs erzeugten Wärmefreisetzung befindet. In Fig. 2 veranschaulicht die Kurve 24 eine oszillierende Druckwelle, wie sie in einer Verbrennungskammer gemäß Fig. 1, in welcher eine un stetige nichtstationäre Verbrennungsoszillation stattfindet, auftritt. Zu der Oszillation der Flammenfront 20 kommt es, wenn die Transport- bzw. Überführungszeit t_1 einen gewissen Bruchteil der akustischen Verbrennungsperiode ausmacht, wobei die Amplitude der durch die Kurve 24 veranschaulichten Oszillation in dem Maße zunimmt, wie die Phasenübereinstimmung der Druckwelle und der Wärmefreisetzung sich annähern.

Gemäß der vorliegenden Erfindung wird die Stabilisierung der Schwingungen in der Verbrennungszone 22 der Verbrennungskammer 10 durch eine Umstrukturierung oder Verschiebung der Hauptflammenfront 20 in Richtung einer Vergrößerung der Transport- bzw. Überführungszeit t_1 , wodurch die Druck- und Wärmefreisetzungs-Parameter entkoppelt werden, erreicht. Wird diese Phasenübereinstimmungsbeziehung verändert, d. h. entkoppelt, so verringert sich die Schwingungsamplitude, wobei die Verringerung der Schwingungsamplitude mit zunehmender Trennung der Phasenübereinstimmung zwischen der Druckwelle und der periodischen Wärmefreisetzung zunimmt. Gemäß den Fig. 3 und 4 wird das Verbrennungssystem 8 aus Fig. 1 durch Verwendung eines Pilotbrennstoffsteuersystems 26 für die intermittierende oder pulsierende Abgabe des Pilotbrennstoffs von dem Brennstoffvorrat 16 an die Pilotkammer 12 modifiziert. Das Steuer- bzw. Regelsystem 26 weist allgemein ein schnell wirkendes EIN/AUS-Ventil 27 in der Pilotbrennstoffzuleitung 18 auf, wobei dieses Ventil 27 mittels einer geeigneten EIN/AUS-Regelung zur gepulsten Einführung bzw. Abgabe des Pilotbrennstoffs in die Pilotkammer 12 betrieben wird. Diese periodische Einspritzung oder Unterbrechung der Einspritzung des Pilotbrennstoffs in die Pilotoxidationsmittelströmung zur Vermischung mit diesem ergibt diskrete Gemisch-Chargen oder -impulse, wie bei 23 veranschaulicht, die aufeinanderfolgend aus der Pilotkammer in die Verbrennungszone 22 abgegeben werden. Die jeweilige Einspritzung der einzelnen Pilotbrennstoff-/Oxidationsmittel-Chargen dient zur Variation des Äquivalenzverhältnisses der chemischen Brennstoffkonzentration in der Verbrennungszone 22, was die Flammenfront 20 umstrukturiert und sie weiter stromabwärts von dem Pilotkammerende der Verbrennungskammer 10 verschiebt und eine längere Transport- bzw. Überführungszeit t_1 gemäß der Darstellung in Fig. 3 bewirkt. Das Ausmaß der Umstrukturierung und Verlagerung der Flamme ist direkt abhängig von der Kombination aus der Einspritzfrequenz diskreter Pilotbrennstoff-/Oxidationsmittel-Chargen, der Dauer der jeweiligen Einspritzung und dem Äquivalenzverhältnis des Pilotbrennstoff-/Oxidationsmittel-Gemischs.

Der Pilotbrennstoff wird mit einer Frequenz zugeführt, die unabhängig von der und wesentlich kleiner als die Frequenz der in der Verbrennungszone 22 auftretenden Hauptflammen-Schwingungen ist. Gemäß der vorliegenden Erfindung erfolgt bei einer Hauptflammenoszillation im Bereich von etwa 20 bis 5000 Hz die gepulste oder intermittierende Abgabe des Pilotbrennstoffs an die Pilotkammer 12 mit einer eingestellten Frequenz entsprechend weniger als etwa dem halben Wert der Flammenoszillationsfrequenz und mit einer Frequenz im Bereich von etwa 1 Hz bis etwa 2500 Hz. Gemäß einer bevorzugten Ausführung ergibt in einem mit

einem Kohlenwasserstoff-Brennstoff in Gegenwart von Luft betriebenen Verbrennungssystem, bei welchem Verbrennungsdruckoszillationen in der Verbrennungskammer mit einer Frequenz im Bereich von etwa 150 bis 1200 Hz auftreten können, die Pulssteuerung des Pilotbrennstoffs (oder Oxidationsmittels) mit einer Steuer- bzw. Regelfrequenz im Bereich von etwa 10 bis 50 Hz, vorzugsweise 10 bis 20 Hz, eine adäquate Umstrukturierung und Verlagerung der Hauptflamme zur wirksamen Reduzierung der Amplitude und Frequenz von Verbrennungsoszillationen auf einen zufriedenstellenden Pegel, wie bei 32 in Fig. 4 veranschaulicht. Die Größe der in Fig. 4 veranschaulichten, sich bei Anwendung der vorliegenden Erfindung ergebenden Flammenoszillation ist zu gering, um unerwünschte Betriebsprobleme betreffend bauliche Schäden an Komponenten des Verbrennungssystems und/oder eine Verringerung des Wirkungsgrades der Verbrennung in dem System hervorzurufen. Es ist in gleicher Weise zu erwarten, daß die Pulsationssteuerung des Oxidationsmittels für den Pilotbrennstoff bzw. die Pulsationssteuerung getrennter Ströme des Pilotbrennstoffs und des Oxidationsmittels, oder eines Vorgemischs aus dem Pilotbrennstoff und dem Oxidationsmittel, mit einer Frequenz im Bereich von etwa 1 Hz bis etwa 2500 Hz eine zufriedenstellende Verringerung der Druckamplitude der Schwingungen in einer Verbrennungskammer, welche durch un stetige Verbrennung induzierte Druckoszillationen mit Frequenzen im Bereich von etwa 20 Hz bis 5000 Hz erfährt, ergibt.

Das Brennstoff/Oxidationsmittel-Verhältnis in dem in die Verbrennungskammer zugeführten Hauptbrennstoff-/Oxidationsmittel-Gemisch kann in dem Bereich von kleiner bis größer als der stöchiometrische Wert (d. h. einem Brennstoff/Oxidationsmittel-Äquivalenzverhältnis von weniger als Eins bis größer als Eins) liegen. Das Brennstoff/Oxidationsmittel-Äquivalenzverhältnis in dem für die Erzeugung der diskreten Pilotflammenimpulse verwendeten Gemisch kann ebenfalls im Bereich von weniger als Eins bis größer als Eins liegen, für eine zufriedenstellende Ausübung der vorliegenden Erfindung. Da jedoch die jeweilige sekundäre Wärmeenergie in jeder Pilotflamme, wie sie durch die Verbrennung der jeweiligen einzelnen diskreten Chargen oder des Gemischs aus Pilotbrennstoff und Oxidationsmittel erzeugt wird, direkt vom jeweiligen Brennstoffvolumen in jeder dieser Chargen abhängig ist, ist das Äquivalenzverhältnis von Brennstoff zu Oxidationsmittel in den Pilotflammenchargen vorzugsweise größer als Eins, um zu gewährleisten, daß ausreichend sekundäre Wärmeenergie vorliegt, um die gewünschte Umstrukturierung der oszillierenden Flamme zu bewirken, bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung eines angemessenen zeitlichen Abstands zwischen der Einbringung der diskreten Chargen von Pilotbrennstoff und Oxidationsmittel in die Verbrennungskammer.

Gemäß der vorliegenden Erfindung werden etwa 2 bis 20% des gesamten in die Brennstoffkammer 10 eingeführten Brennstoffs periodisch in die Pilotkammer 12 eingespritzt, wobei die Dauer jeder derartigen Einspritzung genügend groß ist, um die Reihe aus voneinander beabstandeten brennstoffreichen Pilotflammenfronten, wie beispielsweise bei 23 in Fig. 3 gezeigt, zu liefern, welche zusammen die Umstrukturierung der oszillierenden Hauptflammenfront 20 und die Stabilisierung des oszillierenden Drucks in der Verbrennungskammer 10 zu bewirken. Beispielsweise kann in einem typischen Verbrennungssystem, bei welchem der Primärbrenn-

stoff ein mageres Vorgemisch oder Äquivalenzverhältnis mit einem Brennstoff/Oxidationsmittel-Verhältnis entsprechend einem Bruchteil von beispielsweise 0,75 des für einen stöchiometrischen Abbrand erforderlichen Wertes ist, der Pilotbrennstoff mit einem Äquivalenzverhältnis von etwa 2,24 eingespritzt werden, zur Erzeugung brennstoffreicher Pilotflammenfronten, bei gleichzeitiger Erhaltung eines Gesamt- oder kombinierten Brennstoff/Oxidationsmittel-Verhältnisses als mageres Vorgemisch mit einem Äquivalenzverhältnis von etwa 0,83.

Die Dauer der jeweiligen einzelnen Impulse der Pilotflamme und das Äquivalenzverhältnis der Pilotbrennstoff-/Oxidationsmittel-Gemische haben eine direkte Auswirkung auf die Umstrukturierung der Hauptflammenfront 20 und besitzen für die vorliegende Erfindung insoweit eine beträchtliche Bedeutung, als jeweils jeder Impuls des Pilotbrennstoff-/Oxidationsmittel-Gemischs in die Verbrennungskammervorrichtung ausreichend und von ausreichender Dauer sein muß, um zu gewährleisten, daß die diskreten Pilotflammen eine angemessene Wärmeenergie zur Wechselwirkung mit der oszillierenden Flamme und deren wirksamer Umstrukturierung in der Verbrennungszone zur Verlagerung bzw. Repositionierung der oszillierenden Flamme ergeben. Wird die Pilotflammenfront mit einer Frequenz im Bereich von etwa 1 Hz bis etwa 2500 Hz, vorzugsweise von 10 bis 50 Hz, gepulst bei Anwendung zur Steuerung von Verbrennungsozillationen im Bereich von etwa 150 bis 1200 Hz, bei Anwendung von Pilotbrennstoff-/Oxidationsmittel-Chargen mit Äquivalenzverhältnissen im Bereich von etwa 0,5 bis 2,5, vorzugsweise im Bereich von etwa 0,6 bis 2,0, und wobei jeweils jeder Impuls der Pilotbrennstoffinjizierung zeitlich eine Dauer von etwa 0,1 ms bis zu einer etwa der Hälfte der Steuerfrequenzperiode entsprechenden Zeit, vorzugsweise im Bereich von etwa 1,0 ms bis etwa 20 ms, besitzt, so bestehen die diskreten Pilotflammenimpulse jeweils über eine ausreichende Zeitdauer, um die Hauptflammenfront 20 umzustrukturieren und zu verlagern, für eine wirksame Entkopplung der Wärmeimpulse von den Druckwellen. Dabei nimmt für den angegebenen Bereich von Steuerfrequenzen die Injektionsdauer des Pilotbrennstoffs vom unteren Ende des oben angegebenen Bereichs in dem Maße zu, als das Äquivalenzverhältnis des Pilotbrennstoff-/Oxidationsmittel-Gemischs vom oberen Ende des angegebenen Bereichs abnimmt.

Fig. 5 veranschaulicht die vorliegende Erfindung in Kombination mit einer Verbrennungskammer (Brennkammer) 34, die mit einer koaxial angeordneten Vormischkammer 36 versehen ist zur Mischung des bei atmosphärischem Druck oder bei einem erhöhten Druck aus einer geeigneten Quelle, wie beispielsweise einem (nicht dargestellten) Kompressor zugeführten Verbrennungsoxidationsmittels mit dem Hauptbrennstoff, der durch eine Leitung 38 und einen Sprühling 39 in die Mischkammer 36 zugeführt wird. Die Verbrennungskammer 34 ist des weiteren mit einer Pilotkammer 40 versehen, die in der gezeigten Weise konzentrisch in der Mischkammer 36 angeordnet ist und mit dem einen Endbereich der Verbrennungskammer 34 in Verbindung steht, wie bei herkömmlichen Verbrennungssystemen unter Verwendung von Pilotkammern. Die aus der Verbrennung der Brennstoff-/Oxidationsmittel-Gemische resultierenden Austrittsgase werden normalerweise aus der Verbrennungskammer durch eine Öffnung in einem der Brennstoff-/Oxidationsmittel-Mischkammer 36 gegenüberliegenden Endbereich der Kammer abge-

führt. Der Pilotbrennstoff, der bei herkömmlicher Magergemisch-Betriebsweise üblicherweise in einer Menge von etwa 2 bis 20% des Gesamtbrennstoffs zugeführt wird, wird durch die Leitung 42 eingeführt und mit einem Teil des Verbrennungsoxidationsmittels vorgemischt, zur Erzeugung einer allgemein bei 44 dargestellten Pilotflamme. Wird dieser Pilotbrennstoff in die Pilotkammer 40 als kontinuierlicher oder nicht-unterbrochener Strom eingeführt, wie in einem herkömmlichen System, oder selbst bei gepulster Zufuhr mit Frequenzen, die größer als etwa die halbe Frequenz der Oszillationen der Hauptflammenverbrennung ist, so steht zu erwarten, daß die Verbrennung des Hauptbrennstoff- und Oxidationsmittelgemischs zusammen mit dem Pilotflammengemisch eine un stetige, nicht-stationäre oszillierende Flammenfront, wie etwa oben anhand der Fig. 1 und 2 beschrieben, bildet, wobei die Amplitude und der Druck der Oszillationen wesentlich größer sind als sie erhalten werden können, wenn man eine niedrigere Steuerfrequenz und in Abhängigkeit von der erwarteten Phasenübereinstimmung der Druckwelle mit der durch die Verbrennung sowohl des Pilotbrennstoffgemischs und des Hauptbrennstoffgemischs erzeugten Wärmeabgabe benutzt.

Die selektive Unterbrechung oder Pulssteuerung der Einspritzung oder Einführung des Pilotbrennstoffs in die Pilotkammer mit der ausgewählten Steuerfrequenz und Dauer wird durch Verwendung einer geeigneten Brennstoffströmungssteuervorrichtung erreicht, um die Hauptflammenfront 46 wirksam weiter stromabwärts von der Vormischkammer 36 weg in eine neue, bei 46a angedeutete Position zu verschieben, d. h. aus dem Bereich heraus, wo akustische Kopplung auftritt. Diese Steuerung zur periodischen Abgabe oder Einspritzung des Pilotbrennstoffs wird in der gezeigten Weise durch ein allgemein bei 48 angedeutetes elektronisches Solenoid erreicht, das mit einer Brennstoffeinspritzvorrichtung oder einem Ventil 50 in einer Brennstoffleitung 42 gekoppelt ist. Jedes beliebige geeignete EIN/AUS-Ventil, wie beispielsweise ein Dreh- oder Kugelventil, oder jeder anderweitige geeignete Ventiltyp, der eine rasche EIN/AUS-Betätigung gestattet, eignet sich zur Verwendung in der vorliegenden Erfindung. Falls erwünscht, kann auch eine pneumatische Fluidikvorrichtung zur gepulsten Brennstoffzufuhr in die Pilotkammer verwendet werden.

Das Hauptprinzip hinsichtlich der erfolgreichen Beherrschung der Verbrennungsinstabilität ist die periodische Variation des Äquivalenzverhältnisses des Pilotbrennstoff- und Oxidationsmittelgemischs. In manchen Anwendungsfällen ist ein gewisses Ausmaß an Oszillation in der Verbrennungskammer tolerierbar oder sogar erwünscht. Daher kann die vorliegende Erfindung dazu dienen, die Oszillationen in kontrollierter Weise auf einen gewünschten Pegel zu reduzieren und auf diesem zu halten.

Gemäß Fig. 6 kann die Steuerung für die periodische Arbeitsweise der Pilotbrennstoffströmungs-Steuervorrichtung und die Periodendauer der periodischen Pilotbrennstoffeinspritzung in einfacher Weise durch Verwendung eines Steuer- bzw. Regelsystems mit offener Schleife erreicht werden, wie bei 51 in Kombination mit der Verbrennungskammer 34 aus Fig. 5 gezeigt. Das Steuer- bzw. Regelsystem 51 mit offener Schleife weist in der dargestellten Weise das Solenoid 48 und die Einspritzvorrichtung 50 in der Pilotbrennstoffleitung 42 auf. Betätigungssignale mit einer Frequenz und für eine Periode in den angegebenen Bereichen können in belie-

biger geeigneter Weise erzeugt werden, beispielsweise mittels eines bei 52 angedeuteten herkömmlichen variablen Frequenzsignalgenerators. Diese Signale werden über eine Leitung 54 einer Solenoidsteuer- oder -treiberschaltung 56 zugeführt, zur wirksamen periodischen Betätigung des Solenoids 48 und der zugeordneten Brennstoffeinspritzvorrichtung 50. Die Arbeitsweise des Signalgenerators 52 zur Pulsation des Pilotbrennstoffs bei der gewünschten Frequenz und Periodendauer kann von Hand durch eine Bedienungsperson erfolgen, nach Feststellung des Vorliegens hoher Druckschwingungen in der Verbrennungskammer durch eine geeignete Ablesanzeige oder durch Verwendung eines einfachen Oszillationsdetektors 58, beispielsweise eines mit der Verbrennungskammer 34 gekoppelten druckempfindlichen Diaphragmas, das über eine Leitung 60, die erforderlichenfalls Verstärker aufweisen kann, mit einer Oszillationsanzeige 62, wie beispielsweise einem herkömmlichen Oszilloskop, verbunden ist. Die Bedienungsperson kann die Ablesung an der Oszillationsanzeige 62 zur manuellen Steuerung der Betätigung des variablen Frequenzsignalgenerators 52 verwenden. Alternativ und vorzugsweise kann die Steuerung der Frequenz des Pilotbrennstoffimpulses automatisch erfolgen, durch Verwendung des von der Oszillationsanzeige 62 gelieferten Signals in einem schematisch bei 64 angedeuteten Computer, der über eine Leitung 66 einen Algorithmus zur Betätigung des Signalgenerators 52 mit der gewünschten Frequenz und Periodendauer für die Einspritzung des Pilotbrennstoffs bei einem vorgegebenen Pegel liefert.

Eine weitere Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist in Fig. 7 veranschaulicht. Bei dieser Ausführungsform erfolgt die selektive periodische Unterbrechung und Bildung der Pilotflammenimpulse 44 durch Impulssteuerung der Pilotoxidationsmittelströmung statt des Pilotbrennstoffs. Bei dieser Ausführungsform ist in der Zufuhrleitung 70 für das Pilotoxidationsmittel ein einfaches EIN/AUS-Ventil 68 vorgesehen, das mittels eines Steuerventils 72, das in ähnlicher Weise wie die Pilotbrennstoffsteuerung 26 in Fig. 3 wirkt, die gepulsten Pilotflammenfronten mit der Frequenz und ausreichenden Dauer liefert, um im wesentlichen die gleiche Verringerung der Amplitude der Flammenfrontschwingungen in der Verbrennungskammer 34 wie bei Impulssteuerung des Pilotbrennstoffs zu erzielen. Auch kann bei dieser Ausführung der Pilotbrennstoff zusammen mit dem Pilotoxidationsmittel periodisch unterbrochen werden, oder aber kontinuierlich der Pilotkammer zugeführt werden, um das gewünschte Äquivalenzverhältnis von Oxidationsmittel und Brennstoff in der Pilotkammer zu gewährleisten.

Es sei darauf hingewiesen, daß eine erfolgreiche Ausführungsform der Erfindung auch unter Verwendung eines Hilfsrohrs zur Brennstoff- und Oxidationsmittelzufuhr praktiziert werden kann, das pulsierende Chargen von Brennstoff und/oder Oxidationsmittel, oder Vorgemische hiervon, direkt in den stromaufwärtigen Endbereich der Verbrennungskammer zuführt, zur Erzeugung einer pulsierenden Pilotflamme ohne Anwendung einer Pilotkammer. Allgemein ist es einfach eine Frage der Zweckmäßigkeit, daß die bevorzugten Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung die Verwendung einer Pilotkammer umfassen, derart daß der gepulste Pilotbrennstoff oder Oxidationsmittel wie in herkömmlichen Verbrennungssystemen zugeführt werden kann. Somit ist die vorhergehende Beschreibung zwar auf Verbrennungssysteme gerichtet, in welchen

die Pilotkammer in Verbindung mit der Verbrennungskammer verwendet wird, jedoch ist der Grundgedanke der vorliegenden Erfindung auf nicht mit einer Pilotkammer versehene Verbrennungskammern anwendbar, indem einfach ein Teil des Brennstoffs und Oxidationsmittels abgezweigt wird und pulsierende Flammenfronten durch die Verbrennung dieses "Pilot"-Brennstoff- und -Oxidationsmittelgemischs in den stromaufwärtigen Bereich der Verbrennungskammer hinein erzeugt werden, wo normalerweise die pulsierenden Pilotflammenfronten vorliegen würden. Des weiteren darf angenommen werden, daß im wesentlichen sämtliche derzeit verwendeten Verbrennungssysteme in einfacher Weise zur Inkorporierung der Verbrennungsozillationskontrolle der vorliegenden Erfindung adaptiert werden können. Man erkennt, daß der erfindungsgemäße Stabilisator für die Druckschwingungen der Verbrennungsvorrichtung und das Verfahren der vorliegenden Erfindung eine wirksame und billige aktive Kontrolle an Hand geben, welche dynamische Druckschwankungen in Verbrennungssystemen auf einen annehmbaren Pegel zu reduzieren vermag, und daß im wesentlichen sämtliche für den Betrieb und die Durchführung der vorliegenden Erfindung erforderlichen Ausrüstungsteile ausreichend weit von der Hochtemperatur-Verbrennungskammer angebracht sein können, um Wärmeschäden an diesen Vorrichtungsteilen oder die Notwendigkeit der Verwendung hochtemperaturbeständiger Ausrüstungsteile zu vermeiden.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur aktiven Kontrolle von unstabiler, Schwingungen erzeugender Verbrennung in einem Verbrennungssystem, umfassend eine Verbrennungskammer (Brennkammer) (10, Fig. 3; 34, Fig. 5 bis 7), welche eine Verbrennungszone (22) mit gegenüberliegenden End- bzw. Stirnbereichen besitzt, sowie Mittel (16 bis 18, 21, Fig. 3; 38, 39, Fig. 5, 7) zur Einleitung eines ersten Gemischs aus einem Brennstoff und einem Oxidationsmittel in die Verbrennungszone an deren einem Endbereich zur Verbrennung des Brennstoff- und Oxidationsmittelgemischs, wobei die Verbrennung des Brennstoff- und Oxidationsmittelgemischs eine oszillierende Flamme (20, Fig. 3; 46, 46a, Fig. 5, 7) innerhalb der Verbrennungszone an einer Stelle zwischen den Endbereichen erzeugt und die Bildung von dynamischen Druckschwingungen innerhalb der Brennkammer bewirkt, wobei die Amplitude dieser Schwingungen von dem Ausmaß einer Phasenübereinstimmung zwischen der durch die jeweiligen einzelnen Schwingungen erzeugten Druckwelle mit der durch die Verbrennung des Brennstoffs in dem Brennstoff- und Oxidationsmittelgemisch erzeugten periodischen Wärmefreisetzung abhängt, gekennzeichnet durch Mittel zur Stabilisierung der Druckschwingung in der Verbrennungsvorrichtung zum Zweck einer Verringerung der Amplitude der Druckschwingungen innerhalb der Verbrennungskammer, die genannten Mittel umfassend Kammermittel (12, Fig. 3; 40, Fig. 5, 6, 7), die mit der Verbrennungskammer an deren einem genannten Endbereich in Verbindung stehen, Brennstoffzufuhrmittel (18, Fig. 3; 42, Fig. 5 bis 7) und Mittel zur Oxidationsmittelzufuhr (15, 17, Fig. 3; 70, Fig. 7), die mit einem der Bauteile Kammermittel und Ver-

brennungskammer gekoppelt sind, zur Einführung von wenigstens einer Strömung von Brennstoff und Oxidationsmittel in diese, unter Bildung eines zweiten Gemischs zur Erzeugung einer Pilotflamme (44, Fig. 5, 7) in der Verbrennungszone an deren genanntem einen Ende, sowie Strömungsregel- bzw. -steuermittel (48, 50, Fig. 5 bis 7; 68, Fig. 7) zur intermittierenden Unterbrechung der Strömung aus wenigstens einer der Komponenten: von den Brennstoff- zufuhrmitteln zugeführter Brennstoff und von den Oxidationsmittelzufuhrmitteln zugeführtes Oxidationsmittel, in die Kammermittel (12; 40) mit einer ausgewählten Frequenz und Dauer zur intermittierenden und aufeinanderfolgenden Unterbrechung und Einschaltung der Strömung von wenigstens einer der Komponenten: Brennstoff und Oxidationsmittel in das genannte eine der Bauteile: Kammermittel und Verbrennungskammer, zur Bildung diskreter zweiter Gemische (23, Fig. 3) hieraus, die zusammen eine pulsierende Pilotflamme in der Verbrennungszone zum Kontakt mit der oszillierenden Flamme in der Verbrennungszone erzeugen, wobei die Frequenz und die Dauer die zweiten Gemische mit ausreichender thermischer Energie liefern, um die Umstrukturierung der oszillierenden Flamme und damit eine ausreichende Repositionierung der oszillierenden Flamme in der Verbrennungszone zu bewirken, um die Phasenbeziehung zwischen jeder jeweiligen Druckwelle und jeder jeweiligen periodischen Wärmeabfuhr von dem Zustand ihrer gegenseitigen Phasenübereinstimmung weg zu verändern, zur Verringerung der Amplitude der Druckschwingungen.

2. Verbrennungssystem nach Anspruch 1, bei welchem die Druckschwingungen eine Frequenz im Bereich von etwa 20 bis 5000 Hz besitzen und die intermittierende Unterbrechung der Strömung der genannten wenigstens einen der Komponenten: Brennstoff von den Brennstoffzufuhrmitteln und Oxidationsmittel aus der Oxidationsmittelzufuhr, mit einer Frequenz erfolgt, die kleiner als etwa die halbe Frequenz der Druckschwingungen ist und im Bereich von etwa 1 bis etwa 2500 Hz liegt.

3. Verbrennungssystem nach Anspruch 2, bei welchem die Strömung wenigstens einer der Komponenten Brennstoff und Oxidationsmittel in das genannte eine der Bauteile: Kammermittel und Verbrennungskammer während einer Zeitdauer im Bereich von etwa 0,1 ms bis zu einer Zeitdauer entsprechend der halben Periode der ausgewählten Frequenz zugeführt wird.

4. Verbrennungssystem nach Anspruch 1, bei welchem die Druckschwingungen mit einer Frequenz im Bereich von etwa 150 bis 1200 Hz erfolgen und bei welchem die intermittierende Unterbrechung der Strömung der genannten wenigstens einen der Komponenten: Brennstoff von den Brennstoffzufuhrmitteln und Oxidationsmittel von den Oxidationsmittelzufuhrmitteln, mit einer Frequenz im Bereich von etwa 10 bis 50 Hz erfolgt.

5. Verbrennungssystem nach Anspruch 4, bei welchem die Strömung aus wenigstens einer der Komponenten: Brennstoff und Oxidationsmittel, in das genannte eine der Bauteile: Kammermittel und Verbrennungskammer, während einer Zeitdauer im Bereich von etwa 1,0 bis 20 ms eingeführt wird.

6. Verbrennungssystem nach Anspruch 1, bei welchem

chem das Verhältnis von Brennstoff zu Oxidationsmittel in dem ersten Gemisch einem Brennstoffäquivalenzverhältnis im Bereich von weniger als Eins bis größer als Eins entspricht und bei welchem das Verhältnis von Brennstoff zu Oxidationsmittel in jedem der genannten zweiten Gemische einem Brennstoffäquivalenzverhältnis im Bereich von weniger als Eins bis größer als Eins entspricht, zur Erzeugung von brennstoffmageren bis brennstoffreichen Impulsen der Pilotflamme, und wobei die Dauer der Einführung des genannten wenigstens einen Stroms in dem Maße zunimmt, als das Brennstoffäquivalenzverhältnis in den genannten zweiten Gemischen in dem Bereich von weniger als Eins bis größer als Eins abnimmt.

7. Verbrennungssystem nach Anspruch 1, bei welchem die genannte wenigstens eine Strömung gesonderte Ströme von Brennstoff und Oxidationsmittel oder eine kombinierte Strömung von Brennstoff und Oxidationsmittel umfaßt, und wobei Mittel vorgesehen sind zur Einführung des wenigstens einen Stroms aus Oxidationsmittel von der Oxidationsmittelzufuhr und Brennstoff von den Brennstoffzufuhrmitteln in das genannte eine der Bauteile: Kammermittel und Verbrennungskammer, entlang einem von dem ersten Gemisch getrennten Pfad (12; 40).

8. Verbrennungssystem nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Brennstoffzufuhrmittel (16) mit den Kammermitteln (12; 40) verbundene erste Leitungsmittel (18, Fig. 3; 42, Fig. 5 bis 7) aufweisen, daß die Mittel zur Oxidationsmittelzufuhr mit den Kammermitteln verbundene zweite Leitungsmittel (15, Fig. 3; 70, Fig. 7) aufweisen und daß die Strömungskontroll- bzw. -steuermittel Ventilmittel (27, Fig. 3; 48, 50, 68, Fig. 5 bis 7) in wenigstens einer von den ersten und zweiten Leitungsmitteln aufweisen, sowie Ventilsteuermittel zur Verstellung der Ventilmittel zwischen ihrer Öffnungs- und ihrer Schließstellung mit einer Frequenz und während einer ausreichenden Zeitdauer zur intermittierenden Einschaltung des Flusses von wenigstens der genannten einen Strömung von Brennstoff und Oxidationsmittel zur Pulsation der Pilotflamme in der Verbrennungszone mit der ausgewählten Frequenz und einer angemessenen Dauer zur Erzielung der Umstrukturierung und Repositionierung der oszillierenden Flamme in der Verbrennungskammer.

9. Verbrennungssystem nach Anspruch 8, bei welchem die Ventilsteuermittel selektiv einstellbare Mittel zur Steuerung und Veränderung der Frequenz und Periodendauer, mit welcher die Pilotflamme gepulst werden, aufweisen.

10. Verbrennungssystem nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß das Brennstoff/Oxidationsmittel-Verhältnis in dem ersten Gemisch einem Brennstoffäquivalenzverhältnis im Bereich von weniger als Eins bis größer als Eins entspricht und zur Erzeugung der Druckschwingungen in der Verbrennungszone mit einer Frequenz im Bereich von 150 bis 1200 Hz führt, daß das Brennstoff-/Oxidationsmittel-Verhältnis in jedem der zweiten Gemische einem Brennstoffäquivalenzverhältnis im Bereich von weniger als Eins bis größer als Eins entspricht zur Erzeugung von brennstoffmageren bis brennstoffreichen Impulsen der Pilotflamme, daß die Ventilmittel (48, 50, Fig. 5 bis 7) in den ersten Lei-

tungsmitteln (42) angeordnet sind, und daß die selektiv betätigbaren Mittel die Brennstoffströmung von den Brennstoffzufuhrmitteln zu den Kammermitteln intermittierend unterbrechen zur Pulsation der Pilotflamme mit einer Frequenz von weniger als etwa der halben Frequenz der Druckschwingungen und im Bereich von etwa 1 bis etwa 2500 Hz und während einer Zeitdauer im Bereich von etwa 0,1 ms bis zu einer Zeit entsprechend einer halben Periodendauer der genannten Frequenz.

11. Verbrennungssystem nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Ventilmittel Brennstoffeinspritzvorrichtungen aufweisen, daß die Ventilsteuermittel auf ein elektrisches Signal ansprechende Mittel zur Betätigung der Brennstoffeinspritzmittel aufweisen, und daß die selektiv verstellbaren Mittel Signalerzeugungsmittel zur Erzeugung einer Reihe diskreter elektrischer Signale zur Betätigung der Brennstoffeinspritzmittel mit der ausgewählten Frequenz und Periodendauer aufweisen.

12. Verbrennungssystem nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß das Brennstoff/Oxidationsmittel-Verhältnis in dem ersten Gemisch einem Brennstoffäquivalenzverhältnis im Bereich von kleiner als Eins bis größer als Eins entspricht und die Erzeugung von Druckschwingungen in der Verbrennungszone mit einer Frequenz im Bereich von etwa 150 bis 1200 Hz ergibt, daß das Brennstoff/Oxidationsmittel-Verhältnis in jedem der zweiten Gemische einem Brennstoffäquivalenzverhältnis im Bereich von kleiner als Eins bis größer als Eins entspricht, um brennstoffmagerer bis brennstoffreicher Impulse der Pilotflamme zu gewährleisten, daß die Ventilmittel in den zweiten Leitungsmitteln angeordnet sind, und daß die selektiv verstellbaren Mittel die Oxidationsmittelströmung von der Oxidationsmittelzufuhr zu den Kammermitteln intermittierend unterbrechen, zur Pulsation der Pilotflamme mit einer Frequenz, die kleiner als etwa die halbe Frequenz der Druckschwingungen ist und im Bereich von etwa 1 bis etwa 2500 Hz liegt, mit einer Dauer im Bereich von etwa 0,1 ms bis zu einer der halben Periodendauer bei der genannten Frequenz entsprechenden Zeit.

13. Verfahren zum Betrieb eines Verbrennungssystems, welches eine Verbrennungskammer (Brennkammer) mit einer Verbrennungszone mit gegenüberliegenden End- bzw. Stirnbereichen sowie Brennstoff- und Oxidationsmittelzufuhrmittel zur Erzeugung und Einführung eines ersten Brennstoff-/Oxidationsmittel-Gemischs in die Verbrennungszone an deren einem Endbereich aufweist zur Verbrennung des ersten Brennstoff-/Oxidationsmittel-Gemischs, wobei die Verbrennung des ersten Gemischs eine oszillierende Flamme in der Verbrennungszone an Stellen zwischen den genannten End- bzw. Stirnbereichen erzeugt unter Bildung dynamischer Druckschwingungen in der Verbrennungskammer mit einer Frequenz im Bereich von etwa 20 Hz bis etwa 5000 Hz, wobei die Amplitude der einzelnen Oszillationen vom Ausmaß der Phasenübereinstimmung der durch jede Schwingung erzeugten Druckwelle mit der durch die Verbrennung des ersten Brennstoff-/Oxidationsmittel-Gemischs erzeugten Wärmefreisetzung abhängt, dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren zur

Verringerung der Amplitude der Schwingungen in der Verbrennungskammer die folgenden Schritte umfaßt: Bildung eines zweiten Gemischs aus getrennten Brennstoff- und Oxidationsmittelströmen, Einführen des zweiten Gemischs in die Verbrennungszone an einer Stelle benachbart dem einen End- bzw. Stirnbereich zur Erzeugung einer Pilotflamme in der Verbrennungszone in deren einem Endbereich; sowie intermittierende Unterbrechung der Strömung von wenigstens einer der das zweite Gemisch bildenden Komponenten Brennstoff und Oxidationsmittel oder zur intermittierenden Unterbrechung der Strömung des zweiten Gemischs zur Erzeugung diskreter Chargen des zweiten Gemischs zur intermittierenden Unterbrechung und Einschaltung der Pilotflamme in der Verbrennungszone mit einer Häufigkeit und einer geeigneten Dauer zur ausreichenden Umstrukturierung und Repositionierung der Flammenfront in der Verbrennungszone aus der genannten Lage, um die Phasenbeziehung zwischen den jeweiligen Druckwellen und den jeweiligen periodischen Wärmefreisetzungen gegenüber der genannten Phasenübereinstimmung zu verändern und hierdurch die Amplitude der Druckschwingungen in der Verbrennungskammer zu verringern.

14. Verfahren zum Betrieb eines Verbrennungssystems nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die intermittierende Unterbrechung der Strömung aus wenigstens einer der die jeweiligen einzelnen diskreten Chargen des zweiten Gemischs bildenden Komponenten: Oxidationsmittel und Brennstoff, oder der Strömung des zweiten Gemischs, mit einer ausgewählten Frequenz von weniger als der halben Frequenz der Druckschwingungen und im Bereich von etwa 1 bis 2500 Hz erfolgt.

15. Verfahren zum Betrieb eines Verbrennungssystems nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Strömung von wenigstens einer der die jeweiligen einzelnen diskreten Chargen des zweiten Gemischs bildenden Komponenten: Brennstoff und Oxidationsmittel, oder die Strömung des zweiten Gemischs, zwischen jeder jeweiligen Unterbrechung der Strömung jeweils für eine Dauer von etwa 0,1 ms bis einer etwa halben Periodendauer der genannten ausgewählten Frequenz entsprechenden Zeit eingeschaltet wird.

16. Verfahren zum Betrieb eines Verbrennungssystems nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß das Brennstoff/Oxidationsmittel-Verhältnis in dem ersten Gemisch einem Brennstoffäquivalenzverhältnis im Bereich von weniger als Eins bis größer als Eins entspricht, daß das Brennstoff/Oxidationsmittel-Verhältnis in den jeweiligen Chargen des zweiten Gemischs einem Brennstoffäquivalenzverhältnis im Bereich von weniger als Eins bis größer als Eins entspricht zur Gewährleistung brennstoffmagerer bis brennstoffreicher Impulse der Pilotflamme, und daß die Dauer der Strömung von wenigstens einer der die jeweiligen Chargen des zweiten Gemischs bildenden Komponenten: Brennstoff und Oxidationsmittel, oder der Strömung des zweiten Gemischs, in dem Maße zunimmt, als das Brennstoffäquivalenzverhältnis in den zweiten Gemischen in dem genannten Bereich von weniger als Eins zu größer als Eins abnimmt.

17. Verfahren zum Betrieb eines Verbrennungssystems nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet,

daß der Verfahrensschritt der intermittierenden Unterbrechung der Strömung von wenigstens einer der Komponenten Brennstoff und Oxidationsmittel und Brennstoff zur Erzeugung diskreter Chargen des zweiten Gemischs durch intermittierende Unterbrechung der Strömung von das zweite Gemisch bildendem Brennstoff erfolgt.

18. Verfahren zum Betrieb eines Verbrennungssystems nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Verfahrensschritt der Unterbrechung der Strömung von wenigstens einer der Komponenten Brennstoff und Oxidationsmittel und Brennstoff zur Erzeugung diskreter Chargen des zweiten Gemischs durch intermittierende Unterbrechung der Strömung von das zweite Gemisch bildendem Oxidationsmittel erfolgt.

19. Verfahren zum Betrieb eines Verbrennungssystems nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Schritt der intermittierenden Unterbrechung der Strömung von wenigstens einer der Komponenten Brennstoff und Oxidationsmittel und Brennstoff zur Erzeugung diskreter Chargen des zweiten Gemischs durch intermittierende Unterbrechung der das zweite Gemisch bildenden Ströme von Brennstoff und Oxidationsmittel erfolgt.

20. Verfahren zum Betrieb eines Verbrennungssystems nach Anspruch 15, gekennzeichnet durch den zusätzlichen Verfahrensschritt, welcher die Erzeugung einer Reihe diskreter elektrischer Signale zur selektiven Unterbrechung und Wiedereinschaltung der Strömung von wenigstens einer der die einzelnen diskreten Chargen des zweiten Gemischs bildenden Komponenten Brennstoff und Oxidationsmittel oder der Strömung des zweiten Gemischs bei der genannten ausgewählten Frequenz und mit der genannten Dauer umfaßt.

21. Verfahren zum Betrieb eines Verbrennungssystems nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Druckschwingungen mit einer Frequenz im Bereich von etwa 150 bis 1200 Hz erfolgen, und gekennzeichnet durch den zusätzlichen Verfahrensschritt, welcher die Erzeugung einer Reihe diskreter elektrischer Signale zur selektiven Unterbrechung und Wiedereinschaltung der Strömung von wenigstens einer der die einzelnen diskreten Chargen des zweiten Gemischs bildenden Komponenten: Brennstoff und Oxidationsmittel, oder der Strömung des zweiten Gemischs, bei einer Frequenz im Bereich von etwa 10 bis 50 Hz umfaßt, und zur Wechselwirkung mit der Frequenz der Signale ausreicht, zur angemessenen Pulsation der Pilotflamme zum Zweck der Umstrukturierung und Repositionierung der oszillierenden Flammenfront von den Stellen in der Verbrennungszone weg, wo die Druckwelle jeder Verbrennungsschwingung in Phasenübereinstimmung oder nahezu in Phasenübereinstimmung mit der während jeder Verbrennungsschwingung erzeugten Wärmefreisetzung steht.

22. Verbrennungssystem nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß der das zweite Gemisch bildende Brennstoff und das Oxidationsmittel ein Volumen entsprechend etwa 2 bis 20% des Volumens des Brennstoffs und Oxidationsmittels in dem ersten Gemisch besitzt.

- Leerseite -

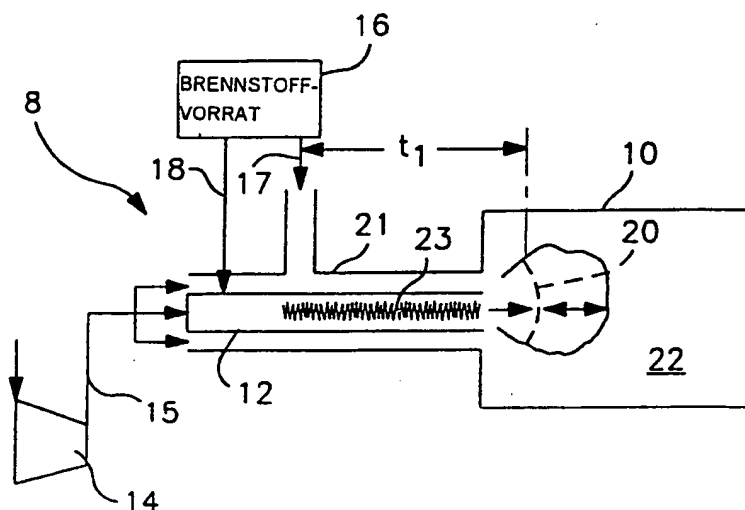


FIG. 1

STAND DER TECHNIK

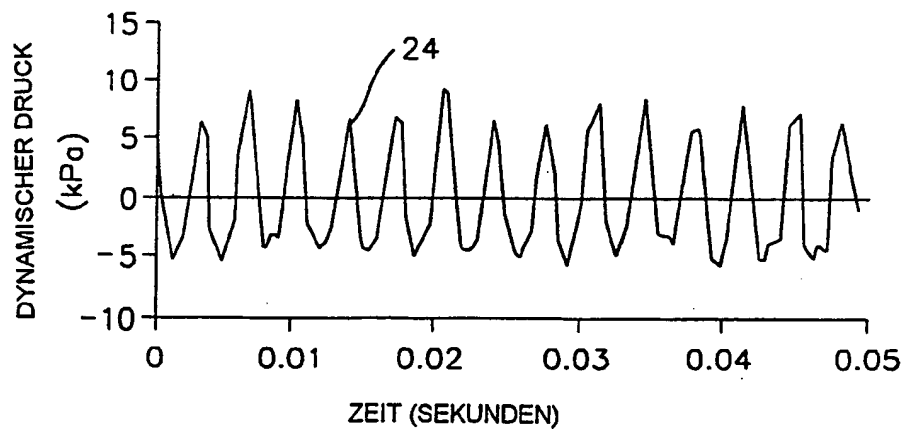


FIG. 2

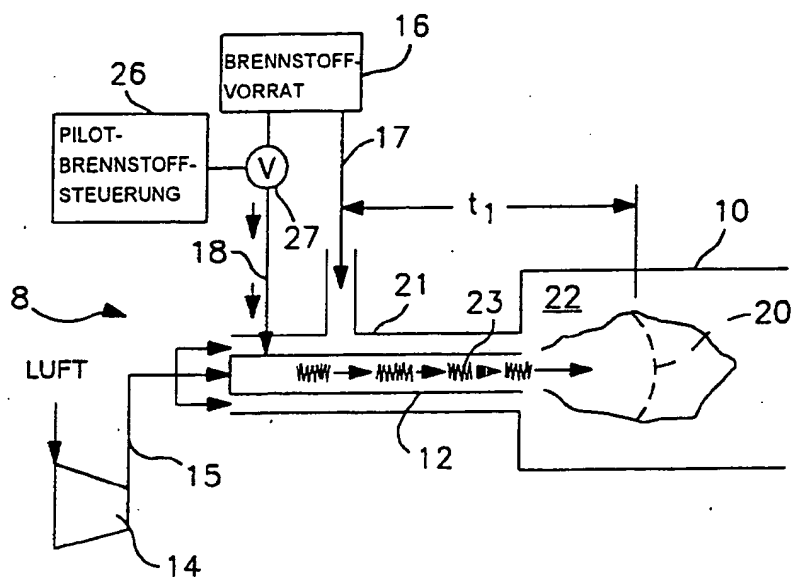


FIG. 3

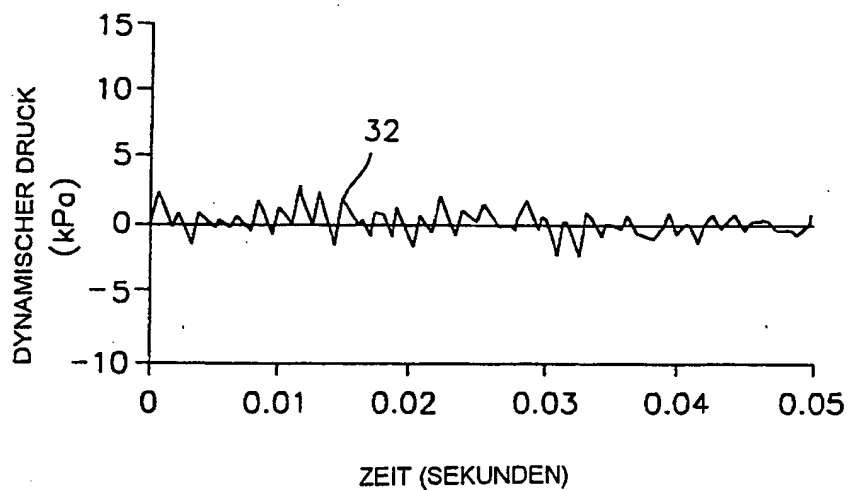


FIG. 4

